

基于全局运动模型配准的图像超分辨重建

黄 婧 李金宗

(哈尔滨工业大学图象信息技术与工程研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要 把全局运动模型配准算法运用到序列图像超分辨重建中, 通过与优化的基于频域的配准法进行对比, 在运动模型可以准确地反映物体运动状态的情况下, 该算法能够更精确地估计运动参数, 从而确保重建后的高分辨率图像拥有更多细节信息。同时, 阐述了参与重建的低分辨率图像帧数越多, 重建精度会越高, 但随着帧数的增多, 重建误差降低幅度会越低, 而算法复杂度及其耗时会过多地增加, 因此提出应根据对重建精度的要求而确定参与重建的低分辨率图像的帧数。

关键词 图像 超分辨 运动模型 配准 误差

中图法分类号: TP237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)08-1354-05

The Image Super-resolution Reconstruction Based on the Global Motion Registration

HUANG Jing, LI Jin-zong

(Institute of Image Information Technology and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The image registration of the global motion model is used successfully to the image super-resolution reconstruction. It can estimate motion parameters more accurately than the optimized registration algorithm in the frequency domain if the motion model is a good approximation to the motion between images, therefore, can insure that the reconstructed high resolution image possesses more details. At the same time, it is expounded that the larger the frame number of the low resolution images is, the more accurate the reconstructed image will be. But with the increasement of the frame number of the LR images, the diversification of the mean square error between the reconstructed image and the real image diminishes, and cost of the algorithm would be increased greatly. So, the frame number of the LR images should be determined according to the precision of the reconstructed image.

Keywords image, super-resolution, motion model, registration, error

1 引 言

图像分辨率是指数字图像中分辨物体细节的能力。在实际应用中, 人们总希望所用的图像具有很高的分辨率, 以便提高目标识别的能力和定位测量的精度。例如, 卫星遥感图像、医学图像和地震图像的应用等都对分辨率提出了比较高的要求, 可是由于成像系统受其固有的传感器阵列排列密度的限制

以及大量外界干扰因素的影响, 尤其图像欠采样造成图像的频谱混叠, 会使所观测的图像分辨率很低, 达不到应用的要求。所以, 图像复原与超分辨技术就成为近年来国内外研究的热点^[1]。

图像超分辨重建是利用低分辨率序列图像重建高分辨率图像, 即可理解为由实际观测到的低分辨率图像重建真实的高分辨率图像。如果序列图像的帧间存在相对运动, 例如平移运动和旋转运动等, 那么这些图像就含有非冗余信息。多帧图像超分辨重

收稿日期: 2006-02-08; 改回日期: 2006-05-09

第一作者简介: 黄婧(1982 -), 女, 哈尔滨工业大学控制科学与工程硕士研究生。主要研究方向为数字图像处理、图像超分辨重建技术。E-mail: jhhit2005@sogou.com

建就是利用这些互补信息以及某些先验信息得到高分辨率图像。

图像超分辨率重建方法主要有频域解混叠方法,空域基于统计理论的 ML、MAP 和 POCS 等估计方法,以及各种插值方法等。1984 年, Tsai&Huang 首先提出了基于多帧具有亚像元位移的欠采样序列图像的超分辨率重建问题,并给出了频域解混叠的基本模型^[2]。Keren 等人提出一种包括整体平移和旋转的超分辨率重建模型^[3],但没能有效解决频谱混叠问题。2004 年, Patrick 等人指出精确的运动估计是超分辨率重建的基础^[4],若规定函数 $h(\vartheta)$ 是在极坐标中对图像的傅里叶变换的模式求积分,那么通过计算 $h(\vartheta)$ 以及频域中的相位差就可以确定图像的旋转和平移参数,并且围绕频谱混叠展开研究,但实验表明其配准结果并不十分理想。

本文把全局运动模型配准算法运用到超分辨率重建过程中,并与文献[4]对比,实验结果表明该方法能更有效地提高配准精度和图像分辨的效果。另外还阐述了低分辨率图像帧数的影响。

2 运动模型

将 t 时刻的图像表示为 $I(x, y, t)$, 其中 $(x, y) \in \Omega, \Omega$ 为图像区域。假设图像亮度恒定, 则

$$I(x, y, t) = I(x + p(x, y, t), y + q(x, y, t), t + 1) \quad (1)$$

其中, $p(x, y, t)$ 和 $q(x, y, t)$ (下文分别简记为 p 和 q) 表示相邻两帧分别在 x 方向和 y 方向上的运动估计。

根据 1 阶 Taylor 展式

$$I(x + p, y + q, t + 1) = I(x, y, t) + pI_x + qI_y + I_t \quad (2)$$

其中, $I_x = \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial x}, I_y = \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial y}, I_t = \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t}$ 。

将式(2)代入式(1), 可得

$$pI_x + qI_y + I_t = 0 \quad (3)$$

由于误差干扰的影响, 式(3)并不恒定, 令

$$Err^{(i)}(p, q) = \sum_{(x, y) \in R} (pI_x + qI_y + I_t)^2 \quad (4)$$

式中, R 为 (x, y) 的邻域。则 p 和 q 可由下式得到

$$(p, q) = \underset{(p, q) \in R}{\min} Err^{(i)}(p, q) \quad (5)$$

图像的全局运动有平移运动和仿射运动等, 这里重点分析仿射运动, p 和 q 可以分别表示为

$$p(x, y, t) = a + bx + cy \quad (6)$$

$$q(x, y, t) = d + ex + fy \quad (7)$$

仿射运动是由旋转与平移构成的, 图像上的同一像素点在相邻图像中的关系为

$$\begin{bmatrix} Sx' \\ Sy' \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & dx \\ \sin\theta & \cos\theta & dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, (x, y) 表示原图像的像素点, (x', y') 表示下一帧图像对应像素点, S 为比例系数, θ 为旋转角, (dx, dy) 为 2 维平移量。可设变换矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & dx \\ \sin\theta & \cos\theta & dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(6)和式(7)代入式(1), 得

$$I(x, y, t) = I(a + (1 + b)x + cy, d + ex + (1 + f)y, t + 1) \quad (10)$$

于是, $x' = a + (1 + b)x + cy, y' = d + ex + (1 + f)y$, 由式(8)得

$$x' = \cos(\theta)x + \sin(\theta)y + dx$$

$$y' = \sin(\theta)x + \cos(\theta)y + dy$$

则 $\cos(\theta) = 1 + b = 1 + f, \sin(\theta) = c = e, dx = a, dy = d$, 通过估计 p 和 q 的值, 就可以得到旋转角 θ , 水平平移 dx 和垂直平移 dy 。

3 全局运动模型配准算法

针对仿射运动, 设 $U(x, y) = \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}, A = [a, b, c,$

$$d, e, f]^T, X(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix}$$

和式(7)可改写为

$$U = XA \quad (11)$$

令 $I_s^T = (I_x, I_y)$, 由式(3)得

$$I_s^T U + I_t = 0 \quad (12)$$

将式(11)代入式(12), 有

$$I_s^T XA + I_t = 0 \quad (13)$$

令 $R = \sum X^T I_s I_s^T X, S = - \sum X^T I_s I_t$,

$$\text{最小化 } Err^{(i)}(p, q) = \sum_{(x, y) \in R} (pI_x + qI_y + I_t)^2 \text{ 得}$$

$$A = R^{-1}S \quad (14)$$

当存在大规模运动时, 上式能克服时间混叠现象。设 $U^0 = XA^0, \Delta U = X(A - A^0) = X\Delta A, f$ 为某一低分辨率图像序列, 满足 $f_s^T \Delta U + f_t = 0$ 则

$$f_s^T XA + (f_t - f_s^T XA^0) = 0 \quad (15)$$

于是, 让

$$\begin{aligned}
 Err^{(i)}(A) &= \sum (f_s^i X A + f_i)^2 \\
 &= Err^{(i)}(\Delta A) \\
 &= \sum (f_s^i X \Delta A + f_i)^2 \\
 &= \sum [f_s^i X A + (f_i - f_s^i X A^0)]^2
 \end{aligned}$$

达到最小,得

$$A = R^{-1}(S + RA^0) = A^0 + R^{-1}S \quad (16)$$

这里 $R = \sum X^T f_s f_s^T X, S = -\sum X^T f_s f_i$, 则

$$\Delta A = R^{-1}S \quad (17)$$

可见,式(14)和式(17)具有相同的形式。

4 实验结果与分析

在实验中,利用两个方法进行帧间图像的配准,并且在配准的基础上进行图像拟合操作,比较两种配准算法的效果。

一种配准算法是上文介绍的基于全局运动模型的配准算法;另一种配准算法是优化的基于傅里叶变换的频域配准算法^[4]。

表 1、表 2 和表 3 分别给出了两种配准方法对旋转角、水平平移量和垂直平移量的仿真实验结果,可以看出,在运动模型可以较准确反映物体运动状态的情况下,基于模型的全局配准算法(简称为 GMRA)估计值比优化的基于傅里叶变换的频域配准算法(简称为 OFTRA)估计值更接近实际值,即本文所建议的配准算法精度更高。

表 1 两种配准方法对旋转角度仿真结果对比

Tab.1 The comparison of two registration approaches on rotation angles

单位:度			
	仿真 1	仿真 2	仿真 3
实际值	0.1253	-1.1465	1.1892
GMRA 估计值	0.2319	-1.0677	1.0323
OFTRA 估计值	-0.1000	0.0000	-0.1000

表 2 两种配准方法对水平平移值仿真结果对比

Tab.2 The comparison of two registration approaches on horizon shifts

单位:像素			
	仿真 1	仿真 2	仿真 3
实际值	-0.8750	-3.3750	0.2500
GMRA 估计值	-0.9616	-3.7429	0.0893
OFTRA 估计值	0.1035	0.1798	-0.1000

表 3 两种配准方法对垂直平移值仿真结果对比

Tab.3 The comparison of two registration approaches on vertical shifts

单位:像素			
	仿真 1	仿真 2	仿真 3
实际值	-3.3750	0.6250	2.3750
GMRA 估计值	-3.2531	1.0024	2.5483
OFTRA 估计值	0.0961	-0.1558	0.3371

利用两种配准算法的结果进行图像拟合操作,在操作中,分别利用 3 帧和 4 帧低分辨率图像得到 1 帧高分辨率图像,图 1 给出了相应超分辨重建的实验结果。图 1 表明,本文所建议的基于全局运动模型配准的图像超分辨重建效果比优化的基于傅里叶变换的频域配准超分辨重建效果好,这是因为前者的配准精度较高的必然结果;另外,4 帧低分辨率图像参与超分辨重建结果比 3 帧低分辨率图像参与重建的结果好,这是因为在运动估计较准确的情况下,被用于插值的像素数增多导致被融合的非冗余信息增多,会使重建的高分辨率图像包含更多的细节。令误差 RMS(root mean squared)为

$$\zeta = \left(\frac{1}{N \times N} \sum_{r=1}^N \sum_{l=1}^N (rec_{rl} - tag_{rl})^2 \right)^{1/2} \quad (18)$$

rec_{rl} 代表所重建的高分辨率图像第 r 行,第 l 列像素的灰度值, tag_{rl} 代表高分辨率参考图像第 r 行,第 l 列像素的灰度值, $N \times N$ 为图像大小。

其中,图 1(a)为高分辨率参考图像;图 1(b)、(c)、(d)为退化(平移、旋转以及下采样)后得到的低分辨率图像;图 1(e)是由图 1(b)、(c)、(d)经优化的频域法配准后得到的超分辨重建图像;图 1(f)为由图 1(b)、(c)、(d)经全局法配准后得到的超分辨重建图像;图 1(g)、(h)、(i)、(j)为退化后得到的低分辨率图像;图 1(k)是由图 1(g)、(h)、(i)、(j)经优化的频域法配准后得到的超分辨重建图像;图 1(l)为由图 1(g)、(h)、(i)、(j)经全局法配准后得到的超分辨重建图像。

图 1(e)、(f)、(k)、(l)的 RMS 分别为 $\zeta_e = 61.57, \zeta_f = 10.152, \zeta_k = 40.7, \zeta_l = 8.2145$ 。

但是,并不是参与超分辨图像重建的低分辨率图像越多越好,为了得到重建效果与低分辨率图像帧数的关系,我们做了有关的实验。在实验中,假定帧间不存在运动估计误差,图 2 给出了参与重建的低分辨率图像帧数与重建图像误差均方值的关系。

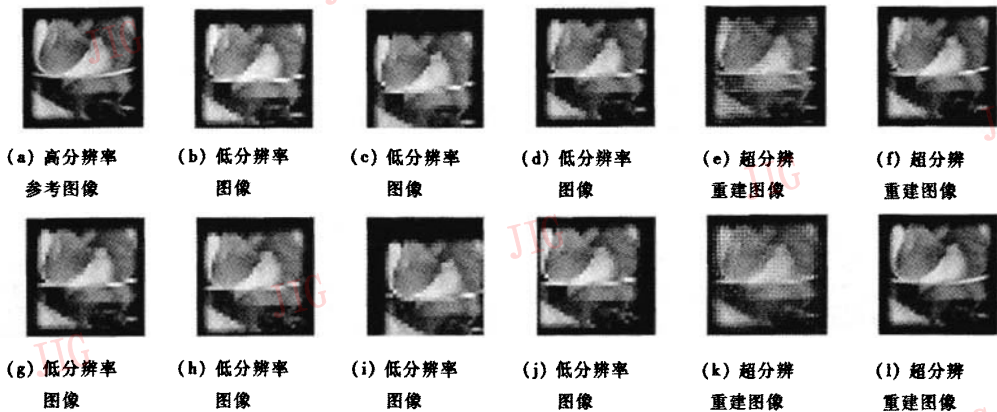


图 1 3 帧和 4 帧低分辨率图像参与超分辨率重建实验结果

Fig. 1 The super-resolution reconstruction respectively by three low-resolution images and four low-resolution images

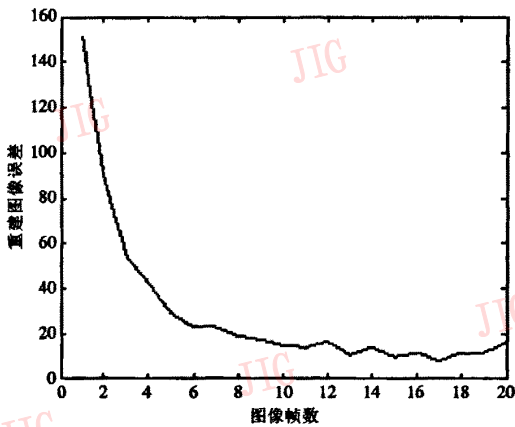


图 2 参与重建的低分辨率图像帧数与误差的关系曲线

Fig. 2 The relationship of the number of Low-Resolution images with the MSE of the reconstruction image

很明显,重建图像误差随着参与重建的低分辨率图像帧数的增加而降低,但当帧数达到一定数目后,误差的下降变缓;当帧数等于 4 时,曲线达到拐点;若帧数大于 4,误差的下降很小而由此导致的算法复杂度和耗时会过多地增加。其中横坐标为低分辨率图像的帧数,纵坐标为误差 $v = \zeta^2$,称为 MSE (mean squared error)。

5 结 论

超分辨率图像重建技术受到 3 个关键因素的影响^[5-10]:一是参与重建的低分辨率图像帧间配准的

精度,所以帧间运动估计十分重要;二是退化模型的精确性,观察模型必须能准确地对成像系统及其退化进行描述;三是图像重建算法必须尽可能包含先验信息。通过理论分析和实验研究表明,本文所建议的基于全局运动模型配准算法效果明显优于优化的基于傅里叶变换的频域配准算法效果,并且实验证明基于全局运动模型配准的图像超分辨率重建效果比优化的基于傅里叶变换的频域配准超分辨率重建效果好,这是因为前者的配准精度较高的必然结果。

实验还证明,重建高分辨率图像的误差随着参与重建的低分辨率图像帧数的增加而降低,但当帧数达到一定数目后,误差的下降变缓,并非参与重建的图像帧数越多越好,应综合考虑超分辨率效果与算法复杂性,所以应根据实际对重建误差的要求确定低分辨率图像的帧数。

参考文献 (References)

- 1 Sung Cheol Park, Min Kyu Park, Moon Gi Kang. Super-resolution image reconstruction: a technical overview [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 1053(5888): 21 ~ 36.
- 2 Huang T S. Multiframe image restoration and registration [J]. Advances in Computer Vision and Image Processing, 1984, 1(7): 317 ~ 339.
- 3 Keren D, Peleg S, Brada R. Image sequence enhancement using sub-pixel displacement [A]. In: Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C], Ann Arbor, MI, USA, 1988: 742 ~ 746.
- 4 Patrick Vandewalle, Sabine Susstruck, Martin Vetterli. A frequency domain approach to super-resolution imaging from aliased low resolution images[EB/OL]. <http://citeseer.ist.psu.edu/675638.html>, 2004-05-04.

- 5 Kim S P, Bose N K, Valenzuela H M. Recursive reconstruction of high resolution image from noisy undersampled multiframe[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990, 38(6):1013 ~ 1027.
- 6 Russell C Hardie, Kenneth J Barnard, Ernest E. Armstrong. Joint MAP registration and high-resolution image estimation using a sequence of undersampled images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1621 ~ 1633.
- 7 Michael Elad, Arie Feuer. Super-resolution reconstruction of image sequences[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(9): 817 ~ 834.
- 8 Nhat Nguyen, Peyman Milanfar, Gene Golub. A computationally efficient superresolution image reconstruction algorithm [J]. IEEE Transactions Image Processing, 2001, 10(4): 573 ~ 583.
- 9 Kim S P, Su W Y. Subpixel accuracy image registration by spectrum cancellation[A]. In: Proceedings IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing [C], Minneapolis, MN, USA, 1993: 153 ~ 156.
- 10 Stone H S, Orchard M T, Chang E C, *et al.* A fast direct Fourier-based algorithm for subpixel registration of images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(10): 2235 ~ 2243.